دومین سمینار راهکارهای بهبود و اصلاح سامانه‌های آبیاری سطحی
۲ خرداد ماه ۱۳۸۷

استفاده از روش‌های ایزوتوپیک و اتمی در ارزیابی بازده مصرف آب[1]

بهنام آبابایی[2]

چکیده

در تمامی نقاط جهان، بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کنندهٔ آب محسوب می گردد (۷۵ تا ۸۰ درصد). در حال حاضر بیشتر آب مورد استفاده برای رشد گیاهان زراعی و باغی، از رطوبت خاک حاصل از بارش استحصال گشته و در حدود ۶۰ درصد از تولیدات کشاورزی کشورهای در حال توسعه مربوط به کشاورزی غیرفاریاب (دیم) می‌باشد. هرچند که آبیاری تنها ۱۰ درصد از نیاز گیاه را تأمین می‌کند و زمینهای تحت آبیاری نیز کمتر از ۲۰ درصد از زمین‌های تحت کشت را شامل می شوند، اما آبیاری نقش اساسی در افزایش میزان محصول دارد. همچنین از آنجاییکه عملکرد زمین‌های تحت آبیاری ۳ برابرِ زمین‌های دیم می باشد، در حدود ۴۰ درصد از کل محصولات غذایی دنیا از این طریق حاصل می‌گردد.

به دلیل رقابت بیشتر بر سر آبِ کم یاب در بین دیگر بخش‌ها و همچنین، افزایش نگرانی‌های عمومی دربارهٔ کیفیت آب، تمرکز بیشتری بر مدیریت بخش کشاورزی اعمال گردیده است. با کاهش منابع آب و افزایش تقاضا، کشاورزی با چالشی دوجانبه مواجه گردیده است:

۱- تولید بیشتر با استفاده از آب کمتر .

۲- جلوگیری از آلودگی آب به وسیلهٔ آلاینده‌های کشاورزی-شیمیایی.

اقداماتی که در این رابطه صورت می گیرند از سیاست‌ها و اقداماتی تشکیل می شوند که برپایهٔ مدیریت تقاضا برای منابع آب بنا گردیده‌اند. این اقدامات شامل ترکیبی از تمهیداتی می‌باشند که تقسیم منصفانه و به میزانِ کافی آب بین بخش‌های مختلف را تضمین می‌نمایند. همچنین مدیریت یکپارچهٔ منابع آب نیز بیش از گذشته مورد نظر قرار گرفته است.

1- Nuclear And Isotopic Techniques

۲- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی کشاورزی، آبیاری و زهکشی، دانشکدهٔ مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

کلید واژه‌ها: راندمان کاربرد آب، رطوبت سنج نوترونی، روش‌های ایزوتوپیک، ایزوتوپ سبک و سنگین، ایزوتوپ‌های پایدار کربن.

۱. افزایش راندمان کاربرد آب در بخش کشاورزی

راندمان کاربرد آب (WUE) دارای مفهوم گسترده ایست و به گونه‌های مختلفی تشریح می‌گردد. برای کشاورزی و مدیران آن، این راندمان به صورت نسبت محصول تولید شده به مقدار آب مصرفی (بارندگی، آبیاری و رطوبت خاک) تعریف می‌شود.

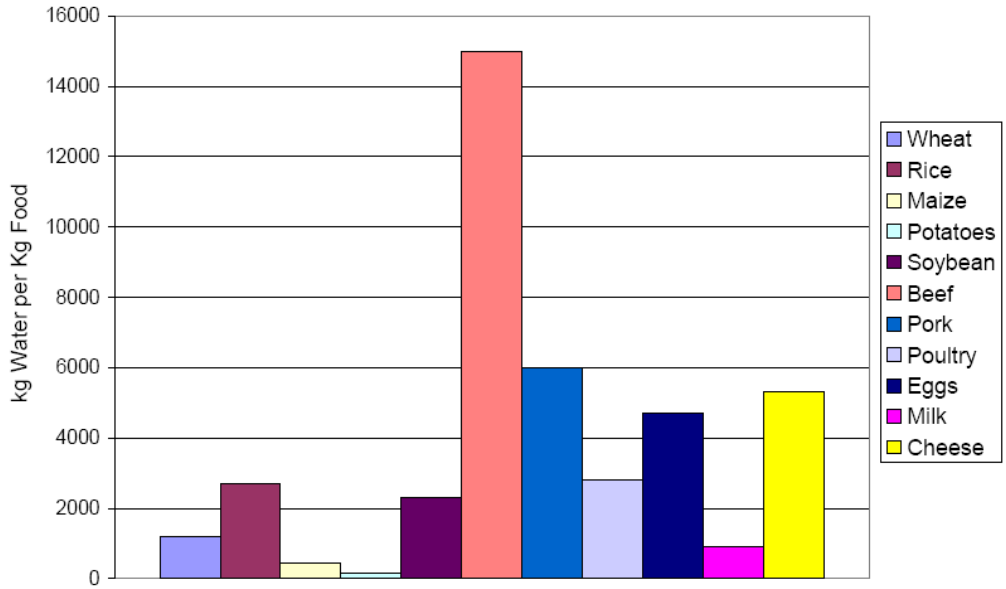
افزایش راندمان کاربرد آب در بخش کشاورزی نیازمند افزایش مقدار محصول تولیدی در ازای هر واحد آب جذب شده توسط گیاه و کاهش تلفات رطوبت از منطقهٔ توسعهٔ ریشهٔ گیاه می‌باشد. مقدار غذای تولید شده در بخش کشاورزی بستگی کامل به مقدار محصول تولیدی در این بخش دارد (شکل ۱). به عنوان نمونه، تولید هر کیلوگرم گوشت گاو ۱۴ برابر آب بیشتری نسبت به تولید هر کیلوگرم گندم نیاز دارد. بنابراین بهبود راندمان کاربرد آب در کشاورزی ممکن است نیاز به برخی تغییرات اقتصادی اجتماعی داشته باشد.

افزایش راندمان کاربرد آب، بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک که بارندگی از الگویی غیرقابل پیش بینی پیروی می‌نماید همواره جزو اهداف اصلی بشمار رفته است. در شرایط بارش، رطوبت خاک می‌تواند به وسیلهٔ تبخیر به هدر رود و یا توسط گیاه جذب شده و سپس به وسیلهٔ تعرق گیاه به اتمسفر وارد گردد. همچنین می‌تواند به وسیلهٔرواناب سطحی و نفوذ عمقی نیز از دسترس خارج گردد.

در شرایط آبیاری، مقداری از آب نیز به دلیل مدیریت نا مناسب آب بین منبع تا گیاه به هدر می‌رود. معمولاً بیش از ۵۰ درصد از آب آبیاری در سطح مزرعه به هدر می‌رود. با اینحال در سطح حوضه، به دلیل بازیافت بخش از این آب توسط آبهای زیرسطحی و زیرزمینی ممکن است این مقدار کمتر باشد.

استراتژی‌های مختلفی به منظور افزایش راندمان کاربرد آب وجود دارند. از جمله اقداماتی که در رابطه با مدیریت یکپارچهٔ منابع آب می‌توان به آنها اشاره داشت عبارتند از: (۱) افزایش باروری خاک به منظور حذف محدودیت مواد غذایی مورد نیاز گیاه در مسیر تولید به ازای هر قطره آبی که به وسیلهٔ آبیاری یا بارندگی به خاک اضافه می‌شود، (۲) بازیافت پایاب مزارع، (۳) اقدامات مربوط به حفاظت آب و خاک از طریق استفاده از بقایای گیاهی و بهبود وضعیت آماده سازی زمین قبل از کشت و (۴) اقدام به شخم عمیق به منظور افزایش مقدار نفوذ و کاهش رواناب و درنتیجه، بهبود وضعیت رطوبتی خاک. بعلاوه، روشهای نوین آبیاری از جمله آبیاری تکمیلی (آبیاری جزئی به منظور تکمیل مقدارِ ناکافیِ بارندگی)، کم آبیاری (کاهش مقدار آب آبیاری در زمان‌هایی که تأثیر بسزایی بر مقدار تولید ندارد) و آبیاری موضعی (که آب را مستقیماً در اختیار منطقهٔ توسعهٔ ریشه قرار می‌دهد) نیز باعث کاهش مقدار تبخیر از سطح خاک و در نتیجه افزایش مقدار رطوبت موجود برای تعرق گیاه می‌شوند. در بسیاری از مناطق بسیار خشک جهان با

بافت خاک سبک و با حاصلخیزی کم، کمبود مواد غذایی برای رشد گیاه تأثیر بیشتری نسبت به کمبود آب دارد. رشد گیاه در این شرایط آنقدر کم است که تنها می‌تواند ۱۰ تا ۱۵ درصد از آب باران را جذب کند و باقی باران به وسیلهٔ تبخیر، رواناب سطحی و نفوذ عمقی به هدر می‌رود. در این شرایط راندمان کاربرد آب می‌تواند بسیار پایین باشد، زیرا مقدار آب مورد نیاز برای تولید غذای یک شخص از مقدارِ متوسط ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلوگرم آب به ازای هر کیلوگرم غذای تولید شده بیشتر خواهد بود (شکل ۱). همچنین افزایش مواد غذایی مورد نیاز گیاه، نه تنها مقدار تولید را افزایش می‌دهد، بلکه مقدار راندمان کاربرد آب را نیز بهبود می‌بخشد. کودآبیاری نیز با افزایش تأثیر متقابل این دو مقوله (آب و مواد غذایی)، راندمان مصرف هر دو را افزایش می‌دهد.



شکل ۱: آب مورد نیاز برای تولید غذا (لیتر آب در ازای هر کیلوگرم غذای تولید شده)

روش‌های اتمی و ایزوتوپیک می‌توانند در افزایش مقادیر راندمان کاربرد آب در بخش کشاورزی نقش عمده‌ای داشته باشند. دلایل آن به شرح زیر می‌باشند:

- بهبود مدیریت آب: افزایش دقت در اندازه گیری رطوبت خاک به منظور برنامه‌ریزی بهینهٔ آبیاری و در نتیجه، کاهش تلفات آب.
- بهینه کردن مقدار آب مصرفی در برای محصول تولیدی.
- کمک به انتخاب و ارزیابی گونه‌های مختلف گیاهان با مقاومت بیشتر در مقابل خشکی و مقدار تولید بیشتر.

۲. استفاده از رطوبت سنج نوترونی و ایزوتوپ‌های پایدار در بهبود مدیریت آب

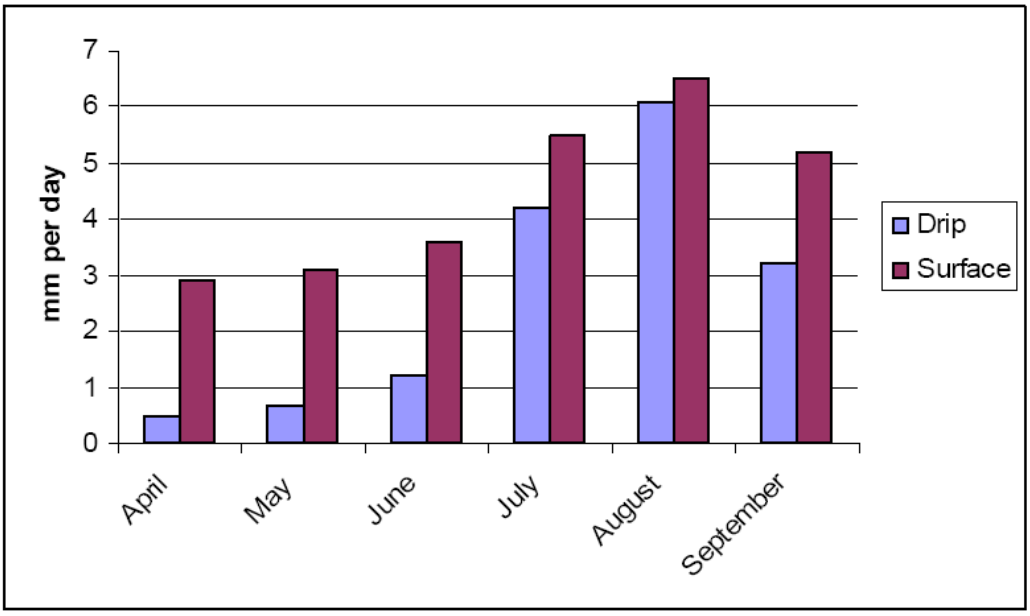
کاهش تلفات آب علاوه بر بهبود وضعیت مدیریت آب، از دیدگاه تلفات مواد غذایی، فرسایش آبی و آلودگی منابع سطحی و زیرزمینی نیز دارای اهمیت است. اندازه گیری دقیق مقدار رطوبت خاک و مقدار رطوبت برداشت شده از خاک بوسیلهٔ تبخیر و تعرق خاک و گیاه به منظور ایجاد تعادل بهینهٔ آب در خاک ضروریست.

۲-۱ کاربرد رطوبت سنج نوترونی

رطوبت سنج نوترونی (SMNP)[1] وسیله ای قابل حمل می‌باشد که به منظور اندازه‌گیری مداوم مقدار رطوبت خاک در عمقهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. (شکل ۲). اطلاعات حاصل از این دستگاه برای محاسبات مربوط به تعادل آبی خاک و همچنین تخمین کل مقدار تخیر و تعرق از خاک و گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات مختلف نشان داده است که استفاده از این دستگاه می‌تواند تا ۵۰ درصد مقدار راندمان کاربرد آب آبیاری را افزایش داده و با بهبود روش‌های مدیریتی، ضمن بهبود وضعیت پوشش سطح زمین، باعث کاهش تبخیز از سطح خاک می‌گردد. به عنوان مثال جایگزین کردن سیستم آبیاری موضعی (که نیازمند اندازه‌گیری دقیق نیاز آبی گیاه می‌باشد) به جای روش غرقابی باعث می‌شود ۲۵ تا ۵۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی شود (شکل ۳). این صرفه جویی مزایای دیگری نیز دارد، از جمله به همین میزان باعث افزایش راندمان کودهای مصرف شده و کاهش آبشویی نیتروژن از محیط ریشه می‌گردد.

شکل ۲: نمونه‌ای از دستگاه رطوبت سنج نوترونی

1- Soil Moisture Neutron Probe.



شکل ۳: جایگزینی آبیاری سطحی با آبیاری قطره‌ای

(نمودار نیاز آبی پنبه در مزارع سوریه؛ در ۳ ماه اول بیش از ۶۰ درصد

در مصرف آب صرفه‌جویی شده است)

رطوبت سنج نوترونی که از سال ۱۹۶۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، وسیله‌ای دقیق و سریع است که بخصوص در هنگامی که نیاز به اندازه گیری‌های دقیق و مرتب رطوبت خاک می‌باشد وسیله‌ای با ارزش محسوب می‌شود. هرچند که روش‌های دیگر اندازهظگیری رطوبت نیز ابداع گردیده‌اند، اما این روش بخصوص در مناطقی که مثلاً شوری خاک می‌تواند بر دقت اندازه‌گیری تأثیر منفی بگذارد متداولتر است.

این دستگاه از دو بخش اصلی تشکیل شده است: میلهٔ اندازه گیری که درون غلافی قرار گرفته و به یک شمارندهٔ الکترونیکی متصل است. میلهٔ اندازه گیری شامل منبع رادیواکتیو (که نوترون‌های سریع را از خود ساتع می‌کند) و یک شمارندهٔ نوترون‌های کند شده می‌باشد. در حین اندازه‌گیری، میله درون لوله‌ای تا عمق مورد نظر در خاک فرو برده می‌شود. نوترون‌های سریعِ ساتع شده از دستگاه به دلیل برخورد با هیدروژن موجود در رطوبت خاک انرژی خود را از دست می‌دهند و از سرعت حرکت آنها کاسته می‌شود. آن بخش از نوترون‌هایی که سرعت خود را از دست می‌دهند نسبت مستقیم با مقدار رطوبت خاک دارد.

رطوبت سنج‌های نوترونی مدرن دارای تجهیزات پیچدهٔ الکترونیکی می‌باشند که با استفاده از منحنی‌های واسنجی تهیه شده توسط کاربر یا کارخانهٔ سازنده مقدار رطوبت خاک را مستقیماً محاسبه کرده و این اطلاعات را می‌توانند در یک کامپیوتر ذخیره نمایند.

۲-۲ کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در مدیریت آب

پیشرفت‌های چشمگیری در رابطه با گسترش و کاربرد روشهای ایزوتوپیک در مدیریت آب در کشاورزی حاصل گردیده است. اندازه‌گیری تغییرات طبیعی در مقدار ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن، هیدروژن، کربن و نیتروژن در آب، خاک و اجزاء گیاه می‌تواند منجر به تعیین منبع آب و مواد غذایی شود که توسط گیاه جذب شده و تأثیر روش‌های مختلف مدیریتی و آبیاری بر جریان آب در منطقهٔ توسعهٔ ریشه‌ها و ورای آن را مشخص می‌سازد. بعنوان مثال، اکسیژن وهیدروژن که هردو جزئی از ساختمان آب می‌باشند، هم به صورت ایزوتوپ‌های سبک و هم ایزوتوپ‌های سنگین وجود دارند. این ایزوتوپ‌ها برای تشخیص تلفات آبِ حاصل از تبخیر از سطح خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرا ایزوتوپ‌های سبگ (^{1}H , ^{16}O) راحتتر از ایزوتوپ‌های سنگین (^{2}H , ^{18}O) تبخیر می‌شوند. نسبتِ بین مقدار ایزوتوپ‌های مختلف (ایزوتوپ‌های سنگین به ایزوتوپ‌های سبک) در رطوبت خاک، در بخار آب بین تاج گیاه و در برگ‌های گیاه می‌تواند معیاری از مقدار تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه باشد. از این اطلاعات برای بهبود روش‌های مدیریت و آبیاری به منظور کاهش تلفات تبخیر از سطح خاک بهره گرفته می‌شود. برخی از گزارش‌های مربوط به استفاده از روش‌های ایزوتوپیک در تعیین مقدار تبخیر از سطح خاک، تعرق از گیاه و نوع منبع آبِ استفاده شده توسط گیاه به شرح زیر می‌باشند:

- تغییر در نسبت مقدار ایزوتوپ‌های مختلف هیدروژن در یک دورهٔ ۱۰ روزه پس از آبیاری سطحی درختان زیتون در مراکش نشان داده است که مقدار تبخیر از سطح خاک از صفر درصد قبل از آبیاری به ۳۱ درصد بعد از آبیاری سطحی افزایش یافته است. این نتایج مشخص می‌سازند که تبخیر بخش عمده‌ای از تلفات را در شرایط منطقهٔ مورد مطالعه شامل شده و در نتیجه، روش‌هایی که منجر به کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شوند، مانند استفاده از آبیاری موضعی، منجر به افزایش چشمگیر راندمان کاربرد آب خواهد گردید.
- تعیین مقدار تعرق از درختان و مقدار تعرق از چمن زیر درختان با استفاده از اندازه‌گیری نسبت بین ایزوتوپ‌های سنگین و سبک هیدروژن و اکسیژن پس از یک دورهٔ بارانی در منطقه‌ای در جنوب غربی آمریکا نشان می‌دهد که کل مقدار تبخیر و تعرق از این خرداقلیم حدود ۳/۵ میلیمتر در روز بوده که ۷۰ درصد از آن مربوط به تعرق از درختان، ۱۵ درصد تعرق از چمن و ۱۵ درصد مربوط به تبخیر از سطح خاک بوده است. این مطالعه نشان داد که درختان بلند باعث کاهش مقدار تبخیر از سطح خاک و افزایش راندمان کاربرد آب در خرد اقلیم می‌شوند.
- در مطالعهٔ دیگری که برروی روشهای مدیریت آب در جنگلداری در بورکینافاسو و نیجریه صورت گرفت نشان داد که تغییر در مقادیر ایزوتوپ‌های سنگین هیدروژن و اکسیژن موجود در خاک، آب و گیاه معیاری از مقدار آبی می‌باشد که از لایه‌های زیرین خاک (۴ تا ۵ متر عمق) بوسیلهٔ ریشهٔ درختان بلند ریشه که در جوار چمن یا گیاهان زراعی روییده اند بالا کشیده شده است.

۳. استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار کربن برای انتخاب و ارزیابی گونه‌های مقاوم به خشکی

کربن، که بخش عمده‌ای از کربوهیدرات موجود در بافت‌های گیاهی را تشکیل می‌دهد، هم به شکل ایزوتوپ سبک کربن ۱۲ و هم ایزوتوپ سنگین کربن ۱۳ موجود است. اندازه‌گیری تغییرات مقدار این دو ایزوتوپ در بافت‌های گیاهی به شکل روزافزون برای انتخاب و ارزیابی گونه‌های مختلف گیاهی مقاوم در برابر خشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از این تکنیک نیازی به اندازه‌گیری بیلان آبی در تعداد زیادی گیاه نیست. در شرایط خشکی، کربن کمتری (به شکل دی اکسید کربن)، بخصوص ایزوتوپ کربن ۱۳ (کربن سنگین)، توسط گیاه از اتمسفر جذب می‌شود. به این ترتیب نسبت بین مقدار کربن ۱۳ به کربن ۱۲ در بافت‌های گیاه تغییر می‌یابد. در یک گونهٔ مقام به خشکی تخلیه (کاهش) مقدار کربن ۱۳ در بافت‌های گیاهی در اثر خشکی کمتر از گونه‌های دیگر مشاهده می‌شود. اختلاف مقادیر کربن ۱۲ و کربن ۱۳ در بافت‌های گیاهی (برگ‌ها و دانه‌ها) به شکل موفقیت‌آمیزی به عنوان معیار انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی مورد استفاده قرار گرفته است (در مورد یونجه، گندم، برنج و بادام زمینی). دانشمندان نشان داده اند که مقدار کربن ۱۳ در برگ‌ها و دانه‌های گیاه نسبت عکس با راندمان کاربرد آب (WUE) دارد. بعنوان معیارِ جایگزینِ راندمان کاربرد آب، می‌توان از تفاوت مقدار دو ایزوتوپ کربن در بافتهای مختلف گیاه در زمان برداشت محصول استفاده نموده و میزان در دسترس بودن آب در دورهٔ رشد گیاه را بررسی نمود.

در تحقیقی که در چند منطقهٔ خشک و نیمه خشک صورت گرفته ثابت شده است که تفاوت مقدار دو ایزوتوپ کربن (که با نماد CID نمایش داده می‌شود) می‌تواند به منظور پیش‌بینی مقدار راندمان کاربرد آب و مقدار محصول گندم بطور قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نشان داده شده است که شاخص CID را می‌توان به عنوان معیارِ پیش‌بینی مقدار محصول گندم تحت شرایط مختلف آب و هوایی مورد استفاده قرار داد، بخصوص اگر دورهٔ خشکی منطبق با دورهٔ پس از گلدهی گیاه باشد.

۴. نتیجه‌گیری

به دلیل کاهشِ رو به فزونی آب در قرن حاضر، گسترش زمینهای فاریاب نسبت به گذشته رو به کاهش گذاشته است. نیاز است تا روش‌های جدید آبیاری تحت شرایط مختلف محیطی و سیستم‌های مختلف تولید محصولات کشاورزی در کشورهای گوناگون مورد آزمایش قرار گیرند. در حالیکه آبیاری در شرایط کمبود آب باعث افزایش محصول و بهبود مقادیر راندمان کاربرد آب می‌گردد، امکان آبیاری کامل در اکثر نقاط دنیا دیگر وجود ندارد (به دلیل رقابت زیاد برای آب در بخش‌های صنعتی و شهری). بنابراین چالش عمده پیش روی کشاورزی فاریاب و دیم، بهبود مقادیر راندمان کاربرد آب و استفادهٔ پایدار از آب در امر کشاورزی می‌باشد. این هدف به روش‌های زیر قابل استحصال است:

- افزایش مقدار تولید محصول در ازای هر واحد آب مصرفی.

- کاهش مقدار آبی که از منطقهٔ ریشهٔ گیاه بدون اینکه مورد استفادهٔ آن قرار گیرد خارج می‌شود (کاهش تلفات).
- افزایش مقدار ظرفیت نگهداری رطوبت خاک با بهبود روشهای مدیریت آب و خاک در سطح مزرعه و حوضه.

امروزه روش‌های اتمی و ایزوتوپیک روشهای با ارزش و قابل اعتمادی برای افزایش راندمان کاربرد آب بشمار می‌روند. رطوبت سنج نوترونی به عنوان ابزاری دقیق برای اندازه گیری و مشاهدهٔ مرتبِ رطوبت خاک شناخته شده است. با اینحال، آموزش افراد متخصص و مسئلهٔ ایمنی در برابر تشعشعات رادیو اکتیو، میزان استفاده از این ابزار را در برخی شرایط تحت تأثیر قرار داده است.

ایزوتوپ‌های پایدار آب (^{2}H و ^{18}O) به منظور ارزیابی جریان آب درون محیط گسترش ریشه و ورای آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این تکنیک‌ها به منظور تفکیک مقادیر تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه استفاده شده است. از اطلاعاتِ کسب شده به وسیلهٔ روش‌های مذکور برای موارد زیر می‌توان استفاده نمود:

- ارزیابی کارایی روش‌های مختلف مدیریت اراضی و آبیاری که باعث کاهش تبخیر از سطح خاک و بهبود تعرق از گیاه می‌شوند.
- مشخص کردن منبع آبی که توسط گیاه جذب شده است.
- تشخیص و گسترش استراتژی‌های مدیریتی که باعث کاهش تلفات آب، مواد غذایی، آفت‌کش‌ها، خاک و کودهای حیوانی و خروج آنها از سطح مزرعه می‌شوند.

نیاز به کاهش این محدودیت‌ها به منظور ایجاد زمینه‌های کشاورزی پایدار روز به روز اهمیت بیشتری می‌یابد. در نهایت، استفاده از اختلاف مقادیر ایزوتوپ‌های کربن سنگین و سبک می‌تواند ابزار بسیار مناسبی برای غربال کردن و ارزیابی شمار زیادی نمونهٔ گیاهی به منظور انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی باشد که در نهایت، منجر به افزایش راندمان کاربرد آب در مناطق کم آب می‌شود.

۵. منابع

1. International Fertilizer Industry Association, Water Availability And Fertilizer Use.
2. International Atomic Energy Agency, Water Balance And Fertigation For Crop Improvement In West Asia, Iaea-Tecdoc-1266 (2002) 117 Pp
3. International Atomic Energy Agency, Food And Agriculture Organization Of The United Nations, Use Of Isotope And Radiation Method In Soil And Water Management And Crop Nutrition (Manual), Training Course Series No 14, (2001) 247 Pp.
4. International Atomic Energy Agency, Nuclear Techniques To Assess Irrigation Schedules For Field Crops, Iaea-Tecdoc-888 (1996) 273 Pp.
5. Greacen, Ed., Soil Water Assessment By The Neutron Method, Csiro, Adelaide (1981) 140 Pp.

6. International Atomic Energy Agency, Neutron And Gamma Probes: Their Use In Agronomy (2nd Edition), Training Course Series No 16, (2003) 73 Pp.
7. Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C., Nielsen, D.R. (Eds.), Crop Yield Response Todeficit Irrigation (1999), Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
8. Food And Agriculture Organization Of The United Nations, International Atomic Energy Agency, Deficit Irrigation Practices, Water Report 22 (2002) 102pp.
9. International Atomic Energy Agency, Optimizing Nitrogen Fertilizer Application To Irrigated Wheat, Iaea-Tecdoc-1164, (2000) 245 Pp
10. International Atomic Energy Agency, Management Of Nutrients And Water In Rainfed Arid And Semi-Arid Areas, Iaea-Tecdoc-1026 (1998)
11. International Atomic Energy Agency, Comparison Of Soil Water Measurement Using The Neutron Scattering, Time Domain Reflectometry And Capacitance Methods, Iaeatecdoc- 1137 (2000) 161 Pp.
12. Fao/Iaea Workshop: Use Of Nuclear Techniques In Addressing Soil-Water-Nutrient Issues For Sustainable Agricultural Production At 18th World Congress Of Soil Science, July 9-15, 2006 – Philadelphia, Pennsylvania, Usa.
13. Food And Agriculture Organization Of The United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, Oecd Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization, International Basic Safety Standards For Protection Against Ionizing Radiation And For The Safety Of Radiation Sources, Safety Series No 115, Iaea, Vienna (1996).
14. Food And Agriculture Organization Of The United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, Oecd Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization, Radiation Protection And The Safety Of Radiation Sources, Safety Series No 120, Iaea (1996).
15. Williams, D.G., Cable, W., Hultine, K., Hoedjes, J.C.B., Yepez, E.A., Simonneaux, V., Er-Raki, S., Boulet, G., De Bruin, H.A.R., Chehbouni, A., Martogensis, O.K., Timouk, F., Evapotranspiration Components Determined By Stable Isotopes, Sap Flow And Eddy Covariance Techniques, Agric. And Forest Meteor. 125 (2004) 241-258.
16. Yepez, E.A., Williams, D.G., Scott, R.L., Lin, G., Partitioning Overstory And Understory Evapotranspiration In A Semiarid Savanna Woodland From The Isotopic Composition Of Water Vapor, Agric. And Forest Meteor. 119 (2003) 53-68.
17. Larwanou, M., Heng, L.K., Abdou, R., Hydraulic Lift Study In Two Native Tree Species In Agroforestry Parkland Of The West African Dry Savannah, Submitted For Publication.
18. Steduto, P., Fereres, E., Hsiao, T.C., Raes, D., Yield Response To Water: The Fao Revision Framework And The Crop-Water Productivity Model Aquacrop. Proceedings Of International Symposium On Water And Land Management For Sustainable Irrigated Agriculture, April 4-8 2006, Cukurova University, Adana, Turkey.

19. Hubick, K., Farquhar, G., Carbon Isotope Discrimination And The Ratio Of Carbon Gains To Water Lost In Barley Cultivars, Plant, Cell And Environment 12 (1989) 795-804.
20. [I-20] Rebetzke, G.J., Condon, A.G., Richards, R.A., Farquhar, G.D., Selection For Reduced Carbon Isotope Discrimination Increases Aerial Biomass And Grain Yield Of Rainfed Bread Wheat, Crop Science, 42 (2002) 739-745.
21. Wright, G., Rao, R.C.N., Farquhar, G.D., Water-Use Efficiency And Carbon Isotope Discrimination In Peanut Under Water Deficit Conditions, Crop Science, 34 (1994) 92-97.
22. Dingkuhn, M., Farquhar, G.D., De Datta, S.K., O'toole, T.C., Discrimination Of 13c Among Upland Rices Having Different Water Use Efficiencies, Austral. J. Of Agric. Res. 42(1991) 1123 1131.
23. Condon, A.G., Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Farquhar, G.D., Improving Intrinsic Water-Use Efficiency And Crop Yield, Crop Science 42 (2002) 122-131.
24. Dercon, G.; Clymans, E., Diels, J., Merckx, R., Deckers, J. Differential 13c Isotopic Discrimination In Maize At Varying Water Stress And At Low To High Nitrogen Availability. Plant And Soil 282 (2006) 313-326.